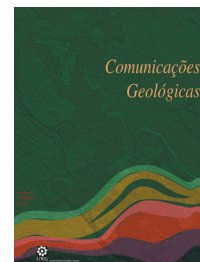


Distribuição da densidade de probabilidade da magnitude de deslizamentos na região norte de Lisboa, Portugal

Slides magnitude probability-density distribution in the north of Lisbon region, Portugal

R. A. C. Garcia^{1*}, S. C. Oliveira¹, J. L. Zêzere¹



Artigo Curto
Short Article

© 2014 LNEG – Laboratório Nacional de Geologia e Energia IP

Resumo: Este trabalho tem como principal objectivo a análise da distribuição da densidade de probabilidade e o estabelecimento de uma curva de probabilidade-magnitude para os deslizamentos ocorridos na região norte de Lisboa (RNL). Assumindo que a área é um indicador fiável da magnitude de um movimento de vertente, a sua distribuição de densidade de probabilidade pode ser a base para o cálculo da probabilidade de ocorrência de um movimento de vertente com uma determinada dimensão. O seu ajuste à função gamma inversa de três parâmetros pode ser efectuado a diferentes bases de dados cujos critérios de partição foram a profundidade do plano de ruptura ou a unidade litológica. Os resultados revelam que as distribuições de densidade de probabilidade apresentam em termos gerais uma forma similar à distribuição geral descrita na literatura. No entanto, serão necessárias, algumas, modificações da parametrização para melhor se ajustar à realidade da RNL. Curvas de magnitude obtidas com bases de dados parciais apresentam diferenças significativas quando comparadas com a obtida com o inventário total, que sobrestima e subestima algumas probabilidades de ocorrência. As curvas de magnitude definidas especificamente para cada unidade litológica parecem ser uma opção para minimizar este problema.

Palavras-chave: Deslizamentos, Densidade de probabilidade, Magnitude.

Abstract: This work applied to landslides in the north of Lisbon region (RNL) aims to compare probability-density distributions and to establish a landslide probability-magnitude curves. Assuming that landslide area is a proxy of landslide magnitude, its probability-density distribution can support the evaluation of the probability of occurrence of a landslide of a given magnitude. Moreover, the adjustment to a general landslide magnitude distribution (three parameter inverse gamma) can be done. This methodology is applied to different landslide datasets, split by depth of slip surface or lithological units. Results reveal that probability-density curves show a similar shape to the general distribution. However, some parameterization adjustments should be made to better fit to north of Lisbon region reality. Magnitude curves based on partial data sets reveal significant differences when compared to the one computed with the global dataset that can underestimate or overestimate results. The data set split by lithological units can be a good option to minimize this problem.

Keywords: Slides, Probability-density, Magnitude.

1. Introdução

A análise completa da perigosidade é função de três componentes distintas e independentes entre si (Guzzetti *et al.*, 2005): probabilidade espacial, probabilidade temporal e probabilidade de magnitude. No entanto, é muito frequente que a análise da perigosidade incida maioritariamente na análise dos parâmetros “espaço” e “tempo” e menos na avaliação da probabilidade de ocorrência de uma instabilidade de vertente tendo em conta a sua dimensão. A análise meramente frequencista, não tendo em conta a magnitude do fenómeno, pode ocultar ou exacerbar o risco real existente, levando a políticas de ordenamento do território inadequadas (Garcia, 2012).

A literatura científica coloca em evidência duas variáveis como indicadores da magnitude de uma instabilidade de vertente: a área (*e.g.* Pelletier *et al.*, 1997; Guzzetti *et al.*, 2002, 2005; Martin *et al.*, 2002; Crosta *et al.*, 2003; Guthrie & Evans, 2004; Malamud *et al.*, 2004; van Den Eeckhaut *et al.*, 2007) e o volume (*e.g.* Martin *et al.*, 2002; Brardinoni & Church, 2004). Embora a tridimensionalidade obtida pelo volume possa ser mais adequada para a avaliação da capacidade destrutiva de uma instabilidade, o facto de raramente existirem profundidades precisas da superfície de ruptura, faz com que este parâmetro seja, na maioria das vezes, estimado. Assim, tendo em conta a elevada correlação existente entre volume e área, e a menor subjectividade no cálculo da superfície instabilizada, é frequente que seja este o parâmetro utilizado como indicador da magnitude, sendo este critério adoptado neste trabalho.

Num estudo realizado por Malamud *et al.* (2004), comparando inventários de instabilidades originados por distintos factores desencadeantes (precipitação, sismo e fusão de neve), os autores concluem que a generalidade das distribuições de magnitude, no mundo, apresenta as mesmas características, ajustando-se à distribuição gamma-inversa de três parâmetros.

Assim, este trabalho tem como objectivos:

¹RISKam - Centro de Estudos Geográficos, Instituto de Geografia e Ordenamento do Território da Universidade de Lisboa, Edifício FLUL, Alameda da Universidade, 1600-214 Lisboa, Portugal.

*Autor correspondente / Corresponding author: rgarcia@campus.ul.pt

i) a comparação da função de densidade de probabilidade geral parametrizada por Malamud *et al.* (2004) com a distribuição dos deslizamentos ocorridos na região norte de Lisboa (RNL);

ii) estabelecer uma função probabilidade-magnitude que possa servir de referência a futuras análises de perigosidade e risco de deslizamentos na RNL.

A área em estudo, situada a norte de Lisboa, tem cerca de 500 km², distribuindo-se pelos municípios de Loures, Vila Franca de Xira, Arruda dos Vinhos, Sobral de Monte Agraço, Alenquer e Torres Vedras. Litologicamente a área de estudo é talhada em formações sedimentares meso-cenozóicas e formações vulcânicas. A intercalação de camadas de rocha com permeabilidades distintas é um dos fortes condicionantes à ocorrência de instabilidades de vertente na região. Estruturalmente integra-se na orla meso-cenozóica ocidental caracterizando-se, grosso modo, por relevos de colinas em estruturas dobradas onde morfologias de tipo costeira, montes anticlinais e depressões sinclinais, são frequentes, não obstante a existência de inversões de relevo ou estruturas falhadas bem definidas (Zêzere *et al.*, 1999).

Trabalho de campo e interpretação de fotografia aérea permitiram a identificação de 2.336 instabilidades de vertente do tipo deslizamento (rotacionais, translacionais e complexos).

2. Metodologia

A análise da distribuição da dimensão-frequência pode ser efectuada através de diversos métodos sendo a determinação de funções de densidade de probabilidade (pdf) um dos mais utilizados na literatura (Martin *et al.*, 2002; Guthrie & Evans, 2004; Malamud *et al.*, 2004; Guzzetti *et al.*, 2005; Brunetti *et al.*, 2009).

No presente trabalho efectua-se a análise da pdf com base na função de distribuição teórica gamma-inversa de três parâmetros, parametrizada por Malamud *et al.* (2004):

$$p(A_L; \alpha, a, s) = \frac{1}{a\Gamma(\alpha)} \left[\frac{a}{A_L - s} \right]^{\alpha+1} \exp \left[-\frac{a}{A_L - s} \right] \quad (\text{eq. 1})$$

sendo:

A_L – a área do movimento de vertente;

α – o parâmetro que controla o decréscimo potencial para movimentos de médias e grandes áreas;

a – o parâmetro que controla a localização da probabilidade máxima da distribuição;

s – o parâmetro que controla o decréscimo potencial para movimentos de pequena dimensão;

$\Gamma(\alpha)$ – a função Gamma de α .

Assim, com base na pdf, é possível estimar a probabilidade de ocorrência de qualquer dimensão de deslizamento, com base no pressuposto que:

$$\int_0^{\infty} pdf(A_L) \times \delta A_L = 1 \quad (\text{eq. 2})$$

sendo:

A_L – área do movimento de vertente;

pdf – densidade de probabilidade da classe;

δA_L – amplitude da classe.

Com base da distribuição teórica adoptada foram definidas diferentes funções de densidade de probabilidade parametrizadas considerando diferentes tipos de bases de dados (BD): i) total dos movimentos inventariados; ii) movimentos de vertente segundo a profundidade estimada do plano de ruptura; iii) movimentos de vertente segundo a unidade litológica. Independentemente do ajuste da função geral (Malamud *et al.*, 2004), aos dados da região norte de Lisboa não foram efetuados quaisquer alterações à parametrização proposta pelos autores (α – 1,4; a – 1280 m²; s – -132 m²).

A separação das instabilidades de vertente em subgrupos prende-se com dois aspectos essenciais: i) avaliar a incerteza das probabilidades gerais relativamente às determinadas considerando movimentos de vertente com profundidades distintas, que frequentemente apresentam condicionalismos distintos e por isso são alvo de análise de susceptibilidade separada (*e.g.* Zêzere *et al.*, 2004, 2008); ii) avaliar a incerteza das probabilidades gerais relativamente às determinadas considerando os fenómenos de instabilidade associados a diferentes unidades litológicas.

3. Resultados e discussão

A tabela 1 representa as características gerais dos diferentes tipos de BD utilizados na análise da distribuição da densidade de probabilidade. Como seria de esperar, à medida que a profundidade do plano de ruptura aumenta também a área dos movimentos registados sofre um incremento. No que diz respeito aos movimentos de vertente separados por unidades litológicas (UL), verifica-se que é em substratos dominados por margas e argilas que se verificam as instabilidades de maior magnitude (média: 8.145 m²; máximo: 262.194 m²) enquanto os movimentos de vertente de menor área se registam em formações vulcânicas (média: 1.948 m²; máximo: 24.597 m²). As diferenças encontradas entre UL estão associadas às características das instabilidades que nestas ocorrem, nomeadamente, à sua profundidade. Na UL margas e argilas, pela sua capacidade de retenção de água, dominam as instabilidades profundas de cariz rotacional, enquanto nas formações vulcânicas o grau de degradação da cobertura superficial leva à ocorrência de movimentos de cariz superficial.

À semelhança de outros fenómenos naturais, os movimentos de vertente tendem a apresentar uma distribuição potencial negativa para ocorrências de média a grande dimensão (*e.g.* van Den Eeckhaut *et al.*, 2007). Na figura 1, com a representação gráfica da aplicação das equações 1 e 2 à totalidade das instabilidades inventariadas, pode observar-se este fenómeno, sendo evidente o decréscimo de frequência de movimentos com dimensões superiores a 1.000 m².

Outra das características destas distribuições, que pode ser observada na RNL, é a existência de uma gama de valores de área onde os fenómenos são mais abundantes (90-200 m²). Para instabilidades com menor dimensão verifica-se uma inversão da tendência potencial negativa (*rollover*), i.e., as instabilidades de menor magnitude não são as mais frequentes.

Tabela 1. Área de movimentos de vertente por tipo de base de dados na região norte de Lisboa.

Table 1. Landslide area by dataset in the region north of Lisbon.

	Base de Dados	# movimentos	Mínimo	Média	Máximo	Desvio-padrão
	Total	2.336	12	4.441	262.194	13.261
Profundidade	≥ 3	494	51	15.443	262.194	26.445
do plano	1,5 < m < 3	900	33	2.091	15.564	1.666
ruptura (m)	≤ 1,5	942	12	580	14.720	1.060
	Margas e argilas	703	12	8.145	262.194	21.096
	Calcários margosos	393	29	3.988	141.706	12.704
Unidade Litológica	Calcários	274	16	3.390	119.806	8.848
	Rochas detriticas	662	25	2.347	86.784	5.239
	Rochas vulcânicas	247	65	1.948	24.597	3.019

A tendência potencial negativa em fenómenos de média a grande magnitude está certamente relacionada com o condicionalismo geométrico da vertente, uma vez que a área de depleção da instabilidade está, geralmente, constrangida à dimensão máxima da vertente em que está inserida, e a frequência de vertentes com grandes dimensões apresenta uma distribuição potencial negativa (e.g. Guthrie & Evans, 2004; Guzzetti *et al.*, 2002). A justificação do *rollover*, não é tão consensual como a anterior, podendo, embora menos frequente, não existir e ocorrer apenas uma diminuição da inclinação da potencial negativa (e.g. Brardinoni & Church, 2004). As causas para a sua ocorrência são mais diversificadas, podendo ser de cariz natural e/ou técnico. De facto, mudanças nas características físicas e ambientais que condicionam as instabilidades (van Den Eeckhaut *et al.*, 2007), as características geotécnicas do substrato cuja resistência pode inibir o aparecimento de movimentos de menor dimensão (Pelletier *et al.*, 1997), limitações na técnica de inventariação ou erosão de sinais de instabilidade

(Guzzetti *et al.*, 2002), são exemplos de factores que podem originar a inversão descrita. No presente caso, embora o inventário não esteja seguramente completo, a inversão descrita, está certamente relacionada com a fisiografia das vertentes e com as características geotécnicas do substrato.

Comparando a distribuição dos movimentos de vertente registados na RNL com a distribuição geral parametrizada por Malamud *et al.* (2004) verifica-se que as características gerais são idênticas. No entanto, verifica-se a necessidade de determinar os valores dos parâmetros da distribuição à realidade portuguesa, em geral, e da área de estudo, em particular (Garcia, 2012; Oliveira, 2012; Marques, 2013). Destaca-se o posicionamento do *rollover* em instabilidades de dimensão inferior ao registado na distribuição geral e o afastamento da potencial nos movimentos de maior dimensão. Estes factos são semelhantes aos registados noutras distribuições onde a importância relativa das instabilidades de vertente de cariz superficial é evidente (e.g. Martin *et al.*, 2002; Crosta *et al.*, 2003).

Analisando as curvas de probabilidade-magnitude verifica-se que a utilização de diferentes tipos de inventário pode influenciar bastante os resultados de probabilidade (Fig. 2). Assim, tendo como exemplo a ocorrência de um movimento de vertente com uma área superior a 1.000 m², verifica-se que tendo em conta a distribuição com a totalidade do inventário a probabilidade de ocorrência é de 0,512. No entanto, se tivermos em conta apenas o inventário de movimentos profundos (profundidade plano ruptura ≥ 3 m) essa probabilidade é de cerca de 0,93, descendo significativamente (0,12) para o inventário dos movimentos superficiais (profundidade plano ruptura ≤ 1,5m). Contudo, a probabilidade de ocorrência com base na profundidade do plano de ruptura só deve ser utilizada se houver uma análise de susceptibilidade diferenciada e, preferencialmente, uma interpretação da geometria das vertentes que permita o constrangimento dos locais onde podem ocorrer instabilidades de maior magnitude.

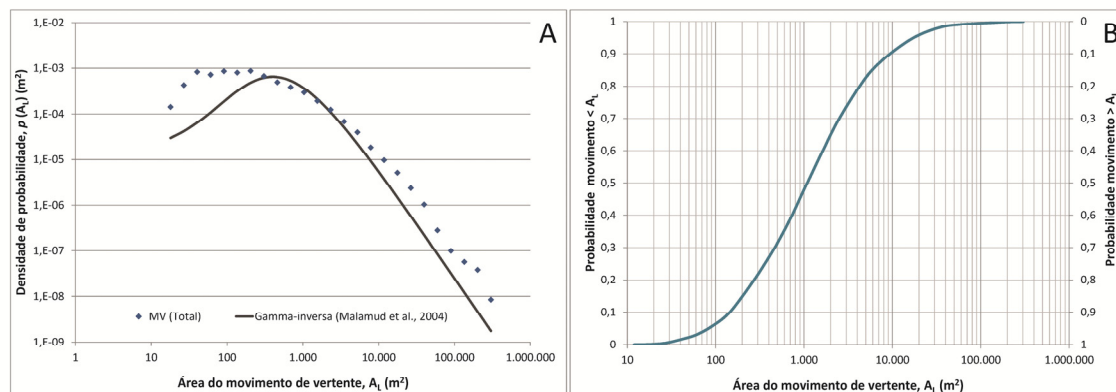


Fig. 1. Densidade de probabilidade da área (A) e probabilidade acumulada e de excedência da magnitude (B) de movimentos de vertente na região norte de Lisboa.

Fig. 1. Slide area probability-density (A) and slide magnitude cumulative and exceedance probability (B) in the region north of Lisbon.

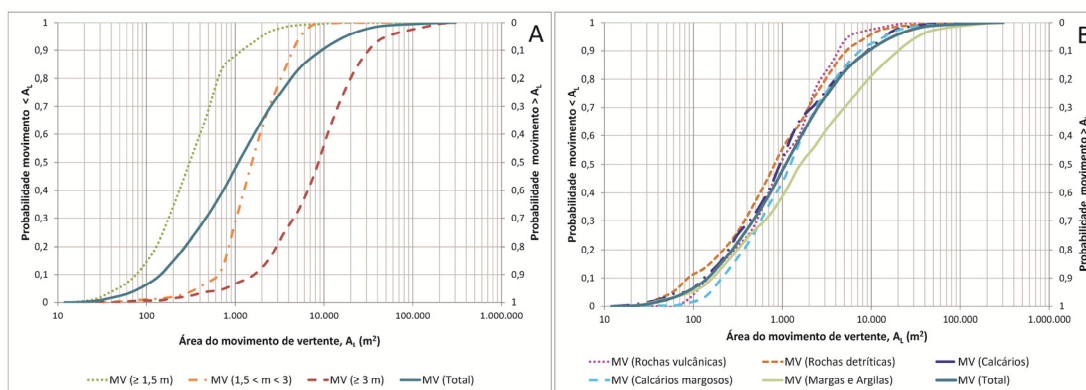


Fig. 2. Probabilidade acumulada e de excedência da magnitude (A_L) de movimento de vertente (MV), na região norte de Lisboa (A – por profundidade do plano de ruptura; B – por unidade litológica).

Fig. 2. Slide cumulative and exceedance magnitude probability (A_L) in the region north of Lisbon (A – sleep surface depth datasets; B – lithological units datasets).

No que diz respeito às diferenças por UL estas também são evidentes. Verifica-se que a probabilidades de ocorrência de instabilidades com área superior à média ($\pm 4.500 \text{ m}^2$) são mais elevadas em substratos de margas e argilas (probabilidade $> 0,3$), enquanto que em formações detriticas ou vulcânicas as probabilidades baixam consideravelmente (0,1 e 0,06, respectivamente). Se tivermos em conta o exemplo anterior, de uma instabilidade com área superior a 1.000 m^2 , verifica-se que a probabilidade pode variar entre 0,605 (UL margas e argilas) e 0,437 (UL rochas detriticas). Assim, tendo em conta que as UL estão usualmente bem identificadas em todos os trabalhos de instabilidade de vertentes, o uso das funções de probabilidade acumulada parametrizadas para cada UL parecem potenciar um melhor ajuste do modelo, evitando sobrestimação ou subestimação inerente função de probabilidade acumulada geral.

4. Considerações finais

A distribuição densidade probabilidade dos deslizamentos na RNL apresenta características semelhantes à distribuição geral obtida por Malamud *et al.* (2004) através da função gamma-inversa três parâmetros. Os resultados possibilitam uma primeira abordagem à probabilidade de excedência de deslizamentos, com determinada magnitude, imprescindível ao cálculo completo da perigosidade. Não obstante a relevância dos resultados obtidos, em futuros trabalhos o ajuste da parametrização da função à realidade estudada pode diminuir a incerteza associada aos valores obtidos. A análise destas distribuições em bases de dados diferenciadas (*e.g.* unidades litológicas) revela-se conveniente, permitindo dados mais pormenorizados e mais ajustados à realidade local, podendo funcionar como uma fonte de informação capaz no ordenamento do território e planeamento de emergência.

Agradecimentos

Este trabalho foi realizado no âmbito do Projecto Pan-European and nationwide landslide susceptibility

assessment, financiado pela European and Mediterranean Major Hazards Agreement (EUR-OPA), Concelho da Europa. O segundo autor é financiado por uma Bolsa de Pós-Doutoramento (SFRH/BPD/85827/2012) da Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT).

Referências

- Brardinoni, F., Church, M., 2004. Representing the landslide magnitude-frequency relation: Capilano river basin, British Columbia. *Earth Surface Processes and Landforms*, **29**, 115-124.
- Brunetti, M.T., Guzzetti, F., Rossi, M., 2009. Probability distributions of landslide volumes. *Nonlinear Processes in Geophysics*, **16**, 179-188.
- Crosta, G.B., Dal Negro, P., Frattini, P., 2003. Soil slips and debris flows on terraced slopes. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **3**(1-2), 31-42.
- Garcia, R.A.C., 2012. *Metodologias de avaliação da perigosidade e risco associado a movimentos de vertente: aplicação na bacia do rio Alenquer*. Tese de doutoramento, Universidade de Lisboa (não publicada), 437 p.
- Guthrie, R.H., Evans, S.G., 2004. Analysis of landslide frequencies and characteristics in a natural system, coastal British Columbia. *Earth Surface Processes and Landforms*, **29**, 1321-1339.
- Guzzetti, F., Malamud, B., Turcotte, D.L., Reichenbach, P., 2002. Power-law correlations of landslide areas in central Italy. *Earth and Planetary Science Letters*, **195**, 169-183.
- Guzzetti, F., Reichenbach, P., Cardinali, M., Galli, M., Ardizzone, F., 2005. Probabilistic landslide hazard assessment at the basin scale. *Geomorphology*, **72**, 272-299.
- Malamud, B., Turcotte, D.L., Guzzetti, F., Reichenbach, P., 2004. Landslide inventories and their statistical properties. *Earth Surface processes and Landforms*, **29**, 687-711.
- Oliveira, S.M.C., 2012. *Instabilidade geomorfológica na bacia do Rio Grande da Pipa (Arruda dos Vinhos)*. Tese de doutoramento, Universidade de Lisboa (não publicada), 452 p.
- Marques, R., 2013. *Estudo de movimentos de vertente no concelho da Povoação (ilha de São Miguel, Açores): inventariação, caracterização e análise da susceptibilidade*. Tese de doutoramento, Universidade dos Açores (não publicada), 456 p+142 p (anexos).
- Martin, Y., Rood, K., Schwab, J.W., Church, M., 2002. Sediment transfer by shallow landsliding in the Queen Charlotte Islands, British Columbia. *Canadian Journal of Earth Sciences*, **39**, 189-205.

- Pelletier, J.D., Malamud, B., Blodget, T., Turcotte, D.L., 1997. Scale-invariance of soil moisture variability and its implications for the frequency-size distribution of landslides. *Engineering Geology*, **48**, 255-268.
- van Den Eeckhaut, M., Poesen, J., Govers, G., Verstraeten, G., Demoulin, A., 2007. Characteristics of the size distribution of recent and historical landslides in a populated hilly region. *Earth and Planetary Science Letters*, **256**, 588-603.
- Zêzere, J.L., Ferreira, A.B., Rodrigues, M.L., 1999. The role of conditioning and triggering factors in the occurrence of landslides: a case study in the area north of Lisbon (Portugal). *Geomorphology*, **30**, 133-146.
- Zêzere, J.L., Garcia, R.A.C., Oliveira, S.C., Reis, E., 2008. Probabilistic landslide risk analysis considering direct costs in the area north of Lisbon (Portugal). *Geomorphology*, **94**, 467-495.
- Zêzere, J.L., Reis, R., Garcia, R.A.C., Oliveira, S.C., Rodrigues, M.L., Ferreira, A.B., 2004. Integration of spatial and temporal data for the definition of different landslide hazard scenarios in the area north of Lisbon (Portugal). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **4**(1), 133-146.